ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА ПРИ ТРЕНИИ В СРЕДЕ РАЗЛИЧНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАСЕЛ

RESEARCH ULTRA-HIGH MOLECULAR WEIGHT POLYETHYLENE PERFORMANCE AT FRICTION IN THE MEDIUM OF VARIOUS LUBRICATING OILS

Е. С. Колесова
Elena S. Kolesova

Институт проблем нефти и газа
Сибирского отделения РАН,
г. Якутск, Российская Федерация

Institute of Oil and Gas,
Siberian Branch, Russian
Academy of Sciences,
Yakutsk, Russian Federation

О. В. Гоголева
Olga V. Gogoleva

Институт проблем нефти и газа
Сибирского отделения РАН,
г. Якутск, Российская Федерация

Institute of Oil and Gas,
Siberian Branch, Russian
Academy of Sciences,
Yakutsk, Russian Federation

П. Н. Петрова
Pavlina N. Petrova

Институт проблем нефти и газа
Сибирского отделения РАН,
г. Якутск, Российская Федерация

Institute of Oil and Gas,
Siberian Branch, Russian
Academy of Sciences,
Yakutsk, Russian Federation

Ф. Ф. Протопопов
Fedor F. Protopopov

Северо-Восточный федеральный
университет им. М.К. Аммосова,
г. Якутск, Российская Федерация

M.K. Ammosov North-Eastern
Federal University,
Yakutsk, Russian Federation

Проведены триботехнические испытания образцов сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) в среде различных смазочных масел. При трении сверхвысокомолекулярного полиэтилена в различных маслах зарегистрировано существенное снижение температуры в 2,5–3,0 раза в зоне контакта металлополимерной трибосистемы по сравнению с трением без смазки. Установлено, что использование трансмиссионного масла в качестве смазочной среды при трении способствует формированию более прочного граничного слоя, предохраняющего материал от изнашивания.

Проведены ускоренные испытания СВМПЭ при трении в среде трансмиссионного масла марки Siboil TAD-17u при скорости скольжения вала 1 м/с в зависимости от прикладываемой нагрузки. Установлено, что начиная с нагрузки выше 1100 Н образец СВМПЭ начинает терять форму вследствие развития процессов пластической деформации, а при нагрузке 1200 Н регистрируется значительное формоизменение образца, что и принято в данных исследованиях за критическое, а за предельный нагрузочно-скоростной режим взят предыдущий за этим режим трения, при котором сохраняется вид износа, характерный для обычных условий эксплуатации.

Установлено, что СВМПЭ работоспособен в узлах трения в среде трансмиссионного масла при $P \cdot V$, не превышающем 1000 Н·м/с. Таким образом, трение в среде жидкой смазки марки Siboil TAD-17u повышает нагрузочную способность СВМПЭ в 3,0–4,0 раза по сравнению с режимом сухого трения.

Ключевые слова

сверхвысокомолекулярный
полиэтилен;
антифрикционные материалы;
площадь дорожки трения;
смазочная среда;
трансмиссионное масло;
нагрузочно-скоростной режим;
коэффициент трения

Полученные данные позволят сформулировать рекомендации по практическому применению сверхвысокомолекулярного полиэтилена в различных смазываемых трибоузлах, где используются полимерные подшипники скольжения.

Tribotechnical tests of samples of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) in the medium of various lubricating oils have been carried out. During friction of ultra-high molecular weight polyethylene in various oils, a significant decrease in temperature in the contact zone of the metal-polymer tribosystem by 2.5–3.0 times compared with friction without lubrication was recorded. It was found that the use of transmission oil as a lubricating medium during friction contributes to the formation of a more durable boundary layer, which protects the material from wear.

Accelerated tests of UHMWPE were carried out under friction in the medium of Siboil TAD-17u transmission oil at a shaft sliding speed of 1 m/s, depending on the applied load. It was found that, starting from a load above 1100 N, the UHMWPE sample begins to lose its shape due to the development of plastic deformation processes, and at a load of 1200 N, a significant shape change of the sample is recorded, which is taken in these studies as critical, and the previous one is taken as the limiting load-speed mode. This is a friction mode in which the type of wear is preserved, which is characteristic for normal operating conditions.

It has been established that UHMWPE is efficient in friction units in a transmission oil environment at $P \cdot V$ not exceeding 1000 N·m/s. Thus, friction in the medium of Siboil TAD-17u liquid lubricant increases the load capacity of UHMWPE 3.0–4.0 times as compared to the dry friction regime.

The data obtained will make it possible to formulate recommendations for the practical application of ultra-high molecular weight polyethylene in various lubricated tribo assemblies where polymer plain bearings are used.

Введение

В ряду полимерных связующих сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) занимает особое место, благодаря высоким износостойкости, коррозионной и химической стойкости [1, 2]. Для улучшения свойств СВМПЭ его модифицируют нанонаполнителями [3–5], в том числе механоактивированными [6–8], используют облучение композитов пучками заряженных частиц [9, 10], метод ионной имплантации [11] и условную химическую модификацию [12].

Благодаря низкой температуре хрупкости (минус 200 °C) изделия на основе СВМПЭ можно применять при экстремально низких температурах окружающей среды. Области применения деталей из разработанных материалов на основе СВМПЭ непрерывно расширяются. Это и карьерная техника, трубопроводы и автомобильный транспорт, а также детали военной техники. Ограничивающим фактором применения изделий из СВМПЭ является невысокая температура плавления (125–130 °C), в связи с чем верхний предел эксплуатации в узлах трения ограничивается 90–100 °C [13] с учетом температурных всплесков на поверхности контакта металлополимерной трибоси-

Keywords

ultra-high molecular weight polyethylene; antifriction materials; friction track area; lubricating medium; transmission oil; load-speed mode; coefficient of friction

Background

Ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) occupies a special place among polymer binders due to its high wear resistance, corrosion and chemical resistance [1, 2]. To improve the properties of UHMWPE, it is modified with nanofillers [3–5], including mechanically activated [6–8]; composites are irradiated with charged particle beams [9, 10], by the method of ion implantation [11], and conventional chemical modification [12].

Due to the low brittleness temperature (minus 200 °C), products based on UHMWPE can be used at extremely low ambient temperatures. The areas of application of parts made of the developed materials based on UHMWPE are constantly expanding. These are quarry equipment, pipelines and road transport, as well as parts of military equipment. The limiting factor for the use of UHMWPE products is the low melting temperature (125–130 °C), and therefore the upper limit of operation in friction units is limited to 90–100 °C [13], taking into account the temperature flashes on the contact surface of the metal-polymer tribosystem, since

стемы, так как эти факторы приводят к существенному локальному разогреву и деградации структуры материала даже при температурах ниже температуры плавления. В связи с этим исследование триботехнических свойств СВМПЭ, позволяющее определить их нагрузочную способность, является актуальной задачей полимерного материаловедения.

Известно, что целый ряд агрегатов и механизмов в силу своего назначения работают в среде жидких смазочных масел, а полимерные детали широко используются в узлах трения в самых разных конструкциях трибосистем, смазываемых как минеральными, так синтетическими маслами. В связи с этим исследованы триботехнические характеристики СВМПЭ в широком нагрузочно-скоростном интервале в среде различных жидких смазочных материалов.

Объекты и методы исследований

Проведены триботехнические исследования СВМПЭ марки Gur-4150. Образцы (внешний диаметр 54 мм, внутренний диаметр 16 мм, толщина 12 мм) получали по технологии горячего прессования. В качестве жидких смазочных сред при трении использованы индустриальное масло марки И-20А и трансмиссионное масло марки Siboil TAD-17u.

Исследования проводили на машине трения ИИ-5018, имитирующей работу подшипников скольжения по ГОСТ Р 50-54-107-88. Схема трения «диск — диск» (рисунок 1), испытание материалов в смазочной среде заключается в том, что контртело опускалось в ванну со смазочным материалом. Использование ванны со смазочным материалом обеспечивает возможность подпитки граничного слоя из объема смазочного материала, таким образом граничная смазка продолжает осуществляться в течение всего времени испытаний. Контртело — стальной вал из стали 45 с твердостью 45–50 HRC и шероховатостью $R_a = 0,06–0,07$ мкм. Для достоверности сравнения результатов в среде смазочных масел за критерий износа образцов принималась площадь дорожки трения (таблица 1). Площадь дорожки трения вычисляли по программе ImageJ 1.46r. В процессе испытаний регистрировали температуру в зоне контакта и момент трения.

Ускоренные триботехнические испытания СВМПЭ проводили согласно методике, указанной в патенте РФ № 2526223 «Способ оценки износостойкости полимерных композиционных материалов» [14].

these factors lead to significant local heating and degradation of the material structure even at temperatures below the melting point. In this regard, the study of the tribotechnical properties of UHMWPE, which makes it possible to determine their load capacity, is an urgent task of polymer materials science.

It is known that a number of units and mechanisms, due to their purpose, operate in the medium of liquid lubricating oils, and polymer parts are widely used in friction units in various designs of tribosystems lubricated with both mineral and synthetic oils. In this regard, the tribotechnical characteristics of UHMWPE have been investigated in a wide load-speed range in a medium of various liquid lubricants.

Objects and research methods

Tribotechnical studies of Gur-4150 UHMWPE were carried out. Samples (outer diameter 54 mm, inner diameter 16 mm, thickness 12 mm) were obtained by hot pressing technology. Industrial oil of I-20A grade and transmission oil of Siboil TAD-17u grade were used as liquid lubricants for friction.

The studies were carried out on an ИИ-5018 friction machine simulating the operation of plain bearings in accordance with State Standard R 50-54-107-88. The friction pattern «disk — disk» (Figure 1), testing of materials in a lubricant medium consists in the fact that the counterbody was lowered into a bath with lubricant. The use of a lubricant bath makes it possible to recharge the boundary layer from the lubricant volume, thus the boundary lubrication continues to be carried out during the entire test period. The counterbody is a steel shaft made of 45 steel with a hardness of 45–50 HRC and a roughness of $R_a = 0.06–0.07$ μm . To reliably compare the results in a lubricating oil environment, the area of the friction track was taken as the wear criterion of the samples (Table 1). The area of the friction track was calculated using the ImageJ 1.46r program. During the tests, the temperature in the contact zone and the friction moment were recorded.

Accelerated tribotechnical tests of UHMWPE were carried out according to the procedure specified in the patent of the Russian Federation No. 2526223 «Method for assessing the wear resistance of polymer composite materials» [14].

1 — образец для испытания; 2 — стальное контртело;
3 — ванна со смазочным материалом

Рисунок 1. Схема трения «диск — диск»

1 — sample for testing; 2 — steel counterbody; 3 — bath with lubricant
Figure 1. Scheme of friction «disk — disk»

Обсуждение результатов

В ранее проведенном исследовании [15] установлено, что ненаполненный СВМПЭ выдерживает максимальную нагрузку 300 Н при скорости скольжения вала 0,5 м/с в режиме сухого трения. При этих условиях проведены испытания образцов СВМПЭ в различных смазочных средах (таблица 1).

При трении СВМПЭ в различных маслах зарегистрировано существенное снижение температуры в зоне контакта металлополимерной трибосистемы в 2,5–3,0 раза по сравнению с трением без смазки. Снижение температуры в зоне фрикционного контакта способствует повышению допустимой нагрузки, т.к. основным ограничивающим фактором использования СВМПЭ в узлах трения несмотря на их уникальную износостойкость и прочность является контактная температура вследствие относительно низкой теплостойкости СВМПЭ.

The discussion of the results

In an earlier study [15], it was found that unfilled UHMWPE can withstand a maximum load of 300 N at a shaft sliding speed of 0.5 m/s in dry friction mode. Under these conditions, tests of UHMWPE samples were carried out in various lubricating media (Table 1).

During friction of UHMWPE in various oils, a significant decrease in temperature in the contact zone of the metal-polymer tribosystem by a factor of 2.5–3.0 compared with friction without lubrication was recorded. A decrease in the temperature in the frictional contact zone contributes to an increase in the permissible load, because the main limiting factor for the use of UHMWPE in friction units, despite their unique wear resistance and strength, is the contact temperature due to the relatively low heat resistance of UHMWPE.

Таблица 1. Характеристики СВМПЭ в зависимости от смазочной среды

Характеристики СВМПЭ	Сухое трение	Смазочная среда	
		Siboil TAD-17u	И-20А
Площадь дорожки трения, мм ²	104,9	23,9	36,1
Температура в зоне контакта, °C	75–90	30–40	30–40

Table 1. Characteristics of UHMWPE depending on the lubricating medium

UHMWPE Characteristics	Dry friction	lubricating medium	
		Siboil TAD-17u	I-20A
Friction track area, mm ²	104.9	23.9	36.1
Contact zone temperature, °C	75–90	30–40	30–40

Принято считать, что коэффициент трения антифрикционных материалов при наличии смазки составляет 0,005–0,05, а без нее – 0,04–0,3 [16, 17]. В связи с этим ограничения по коэффициенту трения полимерных композитов в зависимости от нагрузочно-скоростных режимов трения в данной работе соответствовали этим данным.

На рисунке 2 представлены результаты изменения коэффициента трения от времени испытания. Показано, что при трении СВМПЭ в среде индустриального масла коэффициент трения стабилизируется после 30 мин испытаний, однако значение коэффициента трения превышает значения 0,05, что недопустимо для антифрикционных материалов. При трении СВМПЭ в среде трансмиссионного масла зарегистрированы наименьшие площадь дорожки трения (таблица 1) и существенное снижение коэффициента трения уже после 20 мин испытания (рисунок 2). Это, видимо, связано с наличием в этой марке масла специальных антифрикционных присадок, обеспечивающих формирование более прочного граничного слоя, предохраняющего материал от изнашивания. Это приводит к снижению фактического контакта рабочей поверхности полимерного материала с контртелом, что должно привести к повышению нагрузочной способности полимерного материала.

It is generally accepted that the coefficient of friction of antifriction materials in the presence of lubricant is 0.005–0.05, and without it – 0.04–0.3 [16, 17]. In this regard, the limitations on the coefficient of friction of polymer composites depending on the load-speed friction regimes in this work were consistent with these data.

Figure 2 shows the results of the change in the coefficient of friction over the time of the test. It is shown that during friction of UHMWPE in an industrial oil medium, the friction coefficient stabilizes after 30 min of testing, but the friction coefficient value exceeds 0.05, which is unacceptable for antifriction materials. During friction of UHMWPE in transmission oil, the smallest area of the friction track was recorded (Table 1) and a significant decrease in the friction coefficient after 20 min of testing (Figure 2). This is apparently due to the presence of special antifriction additives in this brand of oil, which ensure the formation of a more durable boundary layer that protects the material from wear. This leads to a decrease in the actual contact of the working surface of the polymer material with the counterbody, which should lead to an increase in the load capacity of the polymer material.

Рисунок 2. Зависимость значений коэффициента трения от времени испытаний и смазочной среды ($V = 0,5$ м/с, $P = 300$ Н)

Figure 2. Dependence of the values of the coefficient of friction on the test time and lubricating medium ($V = 0,5$ м/с, $P = 300$ Н)

Известно, что наибольшее влияние на износостойкость и коэффициент трения оказывает скорость скольжения [18]. В связи с этим проведены ускоренные испытания СВМПЭ при трении в среде трансмиссионного масла марки Siboil TAD-17u при скорости скольжения вала 1 м/с в зависимости от прилагаемой нагрузки (рисунок 3).

Из рисунка 3 видно, что во всем рассматриваемом нагрузочном диапазоне трения для исходного СВМПЭ значения коэффициентов трения не превышают значений 0,04. Наибольшие значения коэффициента трения, соответствующие 0,04, зарегистрированы при трении под нагрузкой 400–600 Н. Начиная с нагрузки 600 Н, наблюдается снижение коэффициента трения СВМПЭ до 0,025. Снижение коэффициента трения обусловлено тем, что при увеличении площади контакта под нагрузкой снижаются контактные давления, оказываемые на материал, при одновременном приросте температуры на 10–15 °С. При этом температура в зоне трения не превышает 60 °С. Однако начиная с нагрузки выше 1100 Н (рисунок 4, б), образец СВМПЭ начинает терять форму вследствие развития процессов пластической деформации, а при нагрузке 1200 Н регистрируется значительное формоизменение образца (рисунок 4, с), что и принято в данных исследованиях за критическое, а за предельный нагрузочно-скоростной режим взят предыду-

It is known that sliding speed has the greatest influence on wear resistance and coefficient of friction [18]. In this regard, accelerated tests of UHMWPE were carried out under friction in the environment of Siboil TAD-17u transmission oil at a shaft sliding speed of 1 m/s, depending on the applied load (Figure 3).

Figure 3 shows that in the entire considered load friction range for the initial UHMWPE, the values of the friction coefficients do not exceed 0.04. The largest values of the friction coefficient, corresponding to 0.04, were recorded under friction under a load of 400–600 N. Beginning with a load of 600 N, a decrease in the friction coefficient of UHMWPE to 0.025 is observed. The decrease in the coefficient of friction is due to the fact that with an increase in the contact area under load, the contact pressures exerted on the material decrease, with a simultaneous increase in temperature by 10–15 °C. At the same time, the temperature in the friction zone does not exceed 60 °C. However, starting with a load above 1100 N (Figure 4, b), the UHMWPE sample begins to lose its shape due to the development of plastic deformation processes, and at a load of 1200 N, a significant deformation of the sample is recorded (Figure 4, c), which is accepted in these studies as critical; and for the limiting load-speed mode, the

Рисунок 3. Зависимость температуры, площади контакта и коэффициента трения СВМПЭ при скорости скольжения вала 1 м/с в смазочной среде Siboil TAD-17u

Figure 3. Dependence of temperature, contact area and friction coefficient of UHMWPE at a shaft sliding speed of 1 m/s in a lubricating medium Siboil TAD-17u

щий за этим режим трения, при котором сохраняется вид износа, характерный для обычных условий эксплуатации.

В связи с этим по результатам ускоренных испытаний можно рекомендовать использование СВМПЭ при трении в трансмиссионном масле при скорости скольжения 1 м/с и нагрузке не более 1000 Н.

Однако ускоренные испытания не дают полного представления о том, что как материал будет себя вести в реальных условиях эксплуатации, т.к. в результате длительного теплового воздействия протекание необратимых деформаций может интенсифицироваться при меньших нагрузках, оказываемых на изнашиваемый материал. Ускоренные испытания дают информацию о том, при каких режимах сразу начинаются необратимые деформационные процессы в материале, при которых недопустима эксплуатация изделий. В связи с этим для уточнения выбора допустимых нагрузочно-скоростных режимов, определенных ускоренными испытаниями, проведены трибоиспытания СВМПЭ в среде трансмиссионного масла на машине трения ИИ-5018. Время испытания составляло 3 ч. Режим трибонагружения ($P \cdot V$) варьировали от 360 до 1000 Н·м/с, при этом скорость скольжения контртела составляла 0,2–1,0 м/с (рисунок 5).

previous friction mode is taken, in which the type of wear is preserved, which is characteristic for normal operating conditions.

In this regard, according to the results of accelerated tests, it is possible to recommend the use of UHMWPE with friction in transmission oil at a sliding speed of 1 m/s and a load of no more than 1000 N.

However, accelerated testing does not give a complete idea of how the material will behave in real operating conditions, because as a result of prolonged heat exposure, the flow of irreversible deformations can intensify at lower loads applied to the wearing material. Accelerated tests provide information about the modes under which irreversible deformation processes in the material begin immediately, in which the operation of products is unacceptable. In this regard, in order to clarify the choice of permissible load-speed modes, determined by accelerated tests, tribo tests of UHMWPE were carried out in a transmission oil medium on an ИИ-5018 friction machine. The test time was 3 h. The tribo loading mode ($P \cdot V$) varied from 360 to 1000 N·m/s, while the sliding speed of the counterbody was 0.2–1.0 m/s (Figure 5).

Рисунок 4. Поверхности трения: 1000 Н (a), 1100 Н (b), 1200 Н (c)

Figure 4. Friction surfaces: 1000 Н (a), 1100 Н (b), 1200 Н (c)

Рисунок 5. Зависимости коэффициента трения и удельного давления от $P \cdot V$

Figure 5. $P \cdot V$ Dependences of the coefficient of friction and specific pressure

Показано, что коэффициент трения во всем интервале $P \cdot V$ ниже 0,03, что соответствует требованиям к коэффициенту трения антифрикционных материалов, работающих в смазочных средах [16, 17]. Установлено, что удельное давление уменьшается с ростом значения $P \cdot V$, что, вероятно, связано с увеличением площади трибоконтакта.

На основании проведенных исследований можно составить рекомендации к применению СВМПЭ при различных $P \cdot V$ при работе в трансмиссионном масле марки Siboil TAD-17u. СВМПЭ следует эксплуатировать в трансмиссионном масле при $P \cdot V$, не превышающем $1000 \text{ Н} \cdot \text{м/с}$. Таким образом, трение в среде жидкой смазки марки Siboil TAD-17u повышает нагрузочную способность СВМПЭ 3,0–4,0 раза по сравнению с режимом сухого трения.

Вывод

Исследования по влиянию жидких смазочных материалов на триботехнические свойства полимерных материалов на основе СВМПЭ показали, что рассмотренные масла одинаково эффективно отводят тепло из зоны трения, наименьшие коэффициент трения и площадь дорожки трения наблюдаются при трении в среде трансмиссионного масла марки Siboil TAD. Установлена зависимость работоспособности образцов СВМПЭ в среде трансмиссионного масла при разных нагрузочно-скоростных режимах. Полученные данные позволяют сформулировать рекомендации по практическому применению сверхвысокомолекулярного полиэтилена в различных смазываемых трибоузлах, где используются полимерные подшипники скольжения.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Hu Z.S., Dong J.X., Chen G.X. Study on Antiwear and Reducing Friction Additive of Nanometer Ferric Oxide // Tribology International. 1998. Vol. 31. Issue 7. P. 355-360. DOI: 10.1016/S0301-679X(98)00042-5.
2. Краснов А.П., Мить В.А., Афоничева О.В., Саид-Галиев Э.Е., Николаев А.Ю., Васильков А.Ю., Подшибихин В.Л., Наумкин А.Ю., Волков И.О. Трение нанокомпозитов серебросодержащего сверхвысокомолекулярного полиэтилена // Вопросы материаловедения. 2009. № 1 (57). С. 161-169.
3. Чурилов Г.Н., Внукова Н.Г., Селютин Г.Е., Осипова И.В. Получение и исследование композита на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена и WO_3 // Физика твердого тела. 2009. Т. 51. № 4. С. 813-814.
4. Охлопкова А.А., Гоголева О.В., Шиц Е.Ю. ПКМ триботехнического назначения на основе СВМПЭ и ультрадисперсных соединений // Трение и износ. 2004. Т. 25. № 2. С. 202-206.

It is shown that the coefficient of friction in the entire interval $P \cdot V$ is below 0.03, which meets the requirements for the coefficient of friction of antifricition materials operating in lubricating media [16, 17]. It was found that the specific pressure decreases with an increase in the value of $P \cdot V$, which is probably associated with an increase in the area of the tribocontact.

Based on the studies carried out, it is possible to draw up recommendations for the use of UHMWPE at different $P \cdot V$ when operating in Siboil TAD-17u transmission oil. UHMWPE should be operated in transmission oil at $P \cdot V$ not exceeding $1000 \text{ N} \cdot \text{m/s}$. Thus, friction in the medium of Siboil TAD-17u liquid lubricant increases the load capacity of UHMWPE 3.0–4.0 times in comparison with the dry friction regime.

Conclusion

Studies on the effect of liquid lubricants on the tribotechnical properties of polymeric materials based on UHMWPE have shown that the considered oils equally efficiently remove heat from the friction zone, the smallest coefficient of friction and the area of the friction track are observed during friction in the medium of Siboil TAD transmission oil. The dependence of the performance of UHMWPE samples in a transmission oil medium at different load-speed conditions has been established. The data obtained will make it possible to formulate recommendations for the practical application of ultra-high molecular weight polyethylene in various lubricated tribo assemblies, where polymer plain bearings are used.

5. Селютин Г.Е., Гаврилов Ю.Ю., Воскресенская Е.Н., Захаров В.А., Никитин В.Е., Полубояров В.А. Композиционные материалы на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена: свойства, перспективы использования // Химия в интересах устойчивого развития. 2010. Т. 18. № 3. С. 375-388.
6. Panin S.V., Wannasri S., Pouvadin T. Increasing Tribotechnical Properties of UHMW-PE Based Composite Materials with Nanomodifiers by Mechanical and Chemical Modification and Surface Irradiation // Fundamental Bases of Mechanochemical Technologies: Materials of III International Conference. Novosibirsk, Russia. 2009. P. 58.
7. Полубояров В.А., Селютин Г.Е., Коротаева З.А., Гаврилов Ю.Ю. Возможности метода механохимических воздействий для приготовления нанодисперсий и модифицирования ими полимеров, металлов, а также для создания керамических материалов // Перспективные материалы. 2008. № S6-2. С. 86-90.

8. Пат. 2296139 РФ, МПК С 08 J 5/16. Антифрикционная полимерная композиция / А.А. Охлопкова, Е.Ю. Шиц, О.В. Гоголева. 2004114691/04, Заявлено 14.05.2004; Опубл. 27.03.2007. Бюл. 9.

9. Панин С.В., Корниенко Л.А., Ванныри С., Пиряон С., Пувадин Т., Иванова Л.Р., Шилько С.В., Сергеев В. Влияние механической активации, ионной имплантации и типа наполнителей на формирование пленки переноса при трибосопряжении композитов на основе СВМПЭ // Механика композитных материалов. 2011. Т. 47. № 5. С. 727-738.

10. Costa L., Bracco P., Brach del Prever E., Luda M.P., Trossarelli L. Analyses of Products Diffused into UHMWPE Prosthetic Components in Vivo // Biomaterials. 2001. Vol. 22. Issue 4. P. 307-315. DOI: 10.1016/S0142-9612(00)00182-4.

11. Panin S.V., Kornienko L.A., Ivanova L.R. Design of Polymeric UHMWPE-Based Composite with Increased Tribotechnical Properties by Mechanical Activation, Ion Implantation, Chemical Modification and Nanofiller Enforcement // Heterogeneous Material Mechanics (ICHMM-2011): Materials of 3rd International Conference. Shanghai, China. 2011. P. 612-615.

12. Панин С.В., Корниенко Л.А., Пиряон С., Иванова Л.Р., Шилько С.В., Плескачевский Ю.М., Орлов В.М. Антифрикционные нанокompозиты на основе химически модифицированного СВМПЭ. Часть 2. Влияние нанонаполнителей на механические и триботехнические свойства химически модифицированного СВМПЭ // Трение и износ. 2011. Т. 32. № 4. С. 355-361.

13. Андреева И.Н., Веселовская Е.В., Наливайко Е.И. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен высокой плотности. Л.: Химия, 1982. 77 с.

14. Пат. 2526223 РФ, МПК G 01 N 3/56. Способ оценки износостойкости полимерных композиционных материалов / А.И. Герасимов, О.В. Гоголева, Н.Р. Адамов. 2012154638/28, Заявлено 17.12.2012; Опубл. 20.08.2014. Бюл. 23.

15. Гоголева О.В., Петрова П.Н., Колесова Е.С. Исследование триботехнических свойств композитов на основе СВМПЭ, в том числе при трении в среде различных смазочных масел // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2020. Т. 13. № 5. С. 517-524. DOI: 10.17516/1999-494X-0243.

16. Машков Ю.К., Малий О.В. Трибофизика конструкционных материалов. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2017. 176 с. Учеб. пособие

17. Гаркунов Д.Н. Триботехника: Износ и безыносность. М.: Машиностроение, 2001. 614 с. Учеб. вузов

18. Машков Ю.К. Трибофизика металлов и полимеров. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2013. 240 с.

REFERENCES

1. Hu Z.S., Dong J.X., Chen G.X. Study on Antiwear and Reducing Friction Additive of Nanometer Ferric Oxide. *Tribology International*, 1998, Vol. 31, Issue 7, pp. 355-360. DOI: 10.1016/S0301-679X(98)00042-5.

2. Krasnov A.P., Mit V.A., Afonicheva O.V., Said-Galiev E.E., Nikolaev A.Yu., Vasilkov A.Yu., Podshibikhin V.L., Naumkin A.Yu., Volkov I.O. Trenie nanokompозитov serebrosoderzhashchego sverkhvysokomolekulyarnogo

polietilena [Friction of Silver-Containing Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Nanocomposites]. *Voprosy materialovedeniya — Inorganic Materials: Applied Research*, 2009, No. 1 (57), pp. 161-169. [in Russian].

3. Churilov G.N., Vnukova N.G., Selyutin G.E., Osipova I.V. Poluchenie i issledovanie kompozita na osnove sverkhvysokomolekulyarnogo polietilena i WO₃ [Preparation and Investigation of the Composite Based on Superhigh-Molecular Poly(Ethylene) and WO₃]. *Fizika tverdogo tela — Physics of the Solid State*, 2009, Vol. 51, No. 4, pp. 813-814. [in Russian].

4. Okhlopova A.A., Gogoleva O.V., Shits E.Yu. PKM tribotekhnicheskogo naznacheniya na osnove SVMPE i ul'tradispersnykh soedinenii [Polymeric Composite Materials for Tribotechnology Applications Based on Superhigh Molecular Polyethylene and Ultradispersed Compounds]. *Trenie i iznos — Friction and Wear*, 2004, Vol. 25, No. 2, pp. 202-206. [in Russian].

5. Selyutin G.E., Gavrilov Yu.Yu., Voskresenskaya E.N., Zakharov V.A., Nikitin V.E., Poluboyarov V.A. Kompozitsionnye materialy na osnove sverkhvysokomolekulyarnogo polietilena: svoystva, perspektivy ispol'zovaniya [Composite Materials Based on Ultrahigh-Molecular Polyethylene: Properties, Outlooks for Use]. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya — Chemistry for Sustainable Development*, 2010, Vol. 18, No. 3, pp. 375-388. [in Russian].

6. Panin S.V., Wannasri S., Pouvadin T. Increasing Tribotechnical Properties of UHMW-PE Based Composite Materials with Nanomodifiers by Mechanical and Chemical Modification and Surface Irradiation. *Materials of III International Conference «Fundamental Bases of Mechanochemical Technologies»*. Novosibirsk, Russia, 2009, P. 58.

7. Poluboyarov V.A., Selyutin G.E., Korotaeva Z.A., Gavrilov Yu.Yu. Vozmozhnosti metoda mekhanokhimicheskikh vozdeystvii dlya prigotovleniya nanodispersii i modifitsirovaniya imi polimerov, metallov, a takzhe dlya sozdaniya keramicheskikh materialov [Possibilities of the Method of Mechanochemical Effects for the Preparation of Nanodispersions and their Modification of Polymers, Metals, as Well as for the Creation of Ceramic Materials]. *Perspektivnye materialy — Perspektivnye Materialy*, 2008, No. S6-2, pp. 86-90. [in Russian].

8. Okhlopova A.A., Shits E.Yu., Gogoleva O.V. Antifriktsionnaya polimernaya kompozitsiya [Anti-Friction Polymer Composition]. Patent RF, No. 2296139, 2007. [in Russian].

9. Panin S.V., Kornienko L.A., Vannasri S., Piriyaon S., Puvadin T., Ivanova L.R., Shilko S.V., Sergeev V. Vliyanie mekhanicheskoi aktivatsii, ionnoi implantatsii i tipa napolnitelei na formirovanie plenki perenosа pri tribosopryazhenii kompozitov na osnove SVMPE [Influence of Mechanical Activation, Ion Implantation, and Filler Type on the Formation of a Transfer Film in Tribounits of UHMWPE-Based Composites]. *Mekhanika kompozitnykh materialov — Mechanics of Composite Materials*, 2011, Vol. 47, No. 5, pp. 727-738. [in Russian].

10. Costa L., Bracco P., Brach del Prever E., Luda M.P., Trossarelli L. Analyses of Products Diffused into UHMWPE Prosthetic Components in Vivo. *Biomaterials*, 2001, Vol. 22, Issue 4, pp. 307-315. DOI: 10.1016/S0142-9612(00)00182-4.

11. Panin S.V., Kornienko L.A., Ivanova L.R. Design of Polymeric UHMWPE-Based Composite with Increased

Tribotechnical Properties by Mechanical Activation, Ion Implantation, Chemical Modification and Nanofiller Enforcement. *Materials of 3rd International Conference «Heterogeneous Material Mechanics (ICHMM-2011)»*. Shanghai, China, 2011, P. 612-615.

12. Panin S.V., Kornienko L.A., Piriyaon S., Ivanova L.R., Shilko S.V., Pleskachevskii Yu.M., Orlov V.M. Antifriktsionnye nanokompozity na osnove khimicheskii modifitsirovannogo SVMPE. Chast' 2. Vliyanie nanonapolnitelei na mekhanicheskie i tribotekhnicheskie svoistva khimicheskii modifitsirovannogo SVMPE [Antifrictional Composites Based on Chemically Modified Uhmwpe. Part 2. The Effect of Nanofillers on the Mechanical and Triboengineering Properties of Chemically Modified Uhmwpe]. *Trenie i iznos – Friction and Wear*, 2011, Vol. 32, No. 4, pp. 355-361. [in Russian].

13. Andreeva I.N., Veselovskaya E.V., Nalivaiko E.I. *Sverkhvysokomolekulyarnyi polietilen vysokoi plotnosti* [Ultra High Molecular Weight High Density Polyethylene]. Leningrad, Khimiya Publ., 1982. 77 p. [in Russian].

14. Gerasimov A.I., Gogoleva O.V., Adamov N.R. *Sposob otsenki iznosostoikosti polimernykh kompozitsion-*

nykh materialov [Method for Assessing Wear Resistance of Polymer Composite Materials]. Patent RF, No. 2526223, 2014. [in Russian].

15. Gogoleva O.V., Petrova P.N., Kolesova E.S. Issledovanie tribotekhnicheskikh svoistv kompozitov na osnove SVMPE, v tom chisle pri trenii v srede razlichnykh smazochnykh masel [Research of Tribotechnical Properties of Composites Based on Uhmwpe, Including Friction in the Environment of Various Lubricants]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii – Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies*, 2020, Vol. 13, No. 5, pp. 517-524. DOI: 10.17516/1999-494X-0243. [in Russian].

16. Mashkov Yu.K., Malii O.V. *Tribofizika konstruksionnykh materialov* [Tribo Physics of Structural Materials]. Omsk, OmGTU Publ., 2017. 176 p. [in Russian].

17. Garkunov D.N. *Tribotekhnika: Iznos i bezyznosnost'* [Tribotechnics: Wear and Tear]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2001. 614 p. [in Russian].

18. Mashkov Yu.K. *Tribofizika metallov i polimerov* [Tribo Physics of Metals and Polymers]. Omsk, OmGTU Publ., 2013. 240 p. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ABOUT THE AUTHORS

Колесова Елена Семеновна, аспирант, инженер, специалист в области композитных материалов на основе и сверхвысокомолекулярного полиэтилена, Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения РАН, г. Якутск, Российская Федерация

Elena S. Kolesova, Postgraduate Student, Engineer, Specialist in the Field of Composite Materials Based on Ultra-High Molecular Weight Polyethylene, Institute of Oil and Gas, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

e-mail: lenok27294@mail.ru

Гоголева Ольга Владимировна, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, специалист в области композитных материалов на основе политетрафторэтилена и сверхвысокомолекулярного полиэтилена, Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения РАН, г. Якутск, Российская Федерация

Olga V. Gogoleva, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher, Specialist in the Field of Composite Materials Based on Polytetrafluoroethylene and Ultra-High Molecular Weight Polyethylene, Institute of Oil and Gas, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

e-mail: oli-gogoleva@yandex.ru

Петрова Павлина Николаевна, канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, специалист в области композитных материалов на основе политетрафторэтилена и сверхвысокомолекулярного полиэтилена, Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения РАН, г. Якутск, Российская Федерация

Pavlina N. Petrova, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Leading Researcher, Specialist in the Field of Composite Materials Based on Polytetrafluoroethylene and Ultra-High Molecular Weight Polyethylene, Institute of Oil and Gas, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

e-mail: ppavlina@yandex.ru

Протопопов Федор Федорович, канд. биол. наук, доцент, специалист в области ИК-спектроскопии, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация

Fedor F. Protopopov, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Specialist in the Field of Infrared Spectroscopy, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation

e-mail: protopopov_fedor@mail.ru